

DOI: 10.7652/xjtuxb201508020

下扎深度对回填式搅拌摩擦点焊接头 断裂行为的影响

岳玉梅¹, 李政玮¹, 马轶男¹, 柴鹏², 邢敬伟¹

(1. 沈阳航空航天大学航空航天工程学部, 110136, 沈阳;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 100191, 北京)

摘要: 为研究焊接工艺参数对回填式搅拌摩擦点焊(RFSSW)接头断裂行为的影响,以铝合金为例,通过改变焊接过程中套筒的下扎深度对上下板厚度不同的 LY12 铝合金进行 RFSSW 试验,从材料流动、原子扩散及接头软化等方面对其接头的断裂机理进行分析,并利用焊点的宏观形貌、显微组织和硬度进行验证。试验及分析结果表明:在 RFSSW 过程中,当套筒未扎透上板、hook 缺陷较平且韧带在整个焊点厚度基本相同时,裂纹主要沿连接强度较弱的搭接面扩展,形成剪切断裂模式;当套筒下扎至下板厚度的 15%、hook 缺陷向上弯曲且套筒回抽路径产生裂纹缺陷时,裂纹更倾向于沿着原子扩散时间较短的套筒回抽路径扩展,形成剪切塞型断裂模式;随着套筒进一步下扎至下板厚的 35%且 hook 缺陷向下弯曲,裂纹更容易沿着下板中的套筒回抽路径向下扩展;当裂纹扩展到下板的下表面时,形成塞型断裂模式,断口形貌与断裂机理的分析结果相吻合。

关键词: 回填式搅拌摩擦点焊;断裂行为;铝合金;下扎深度

中图分类号: TG453 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)08-0122-06

Effects of Plunge Depth on Fracture Behaviors of Refill Friction Stir Spot Welding

YUE Yumei¹, LI Zhengwei¹, MA Yinan¹, CHAI Peng², XING Jingwei¹

(1. Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, 110136, Shenyang;

2. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, 100191, Beijing)

Abstract: Effects of welding parameters on fracture behaviors of refill friction stir spot welding (RFSSW) welds are investigated. RFSSW is used to weld LY12 aluminum alloys with different thicknesses by changing the sleeve plunge depth. The fracture mechanisms of the welds are investigated from the aspects of material flow, atomic diffusion and softening, and are verified by the cross section, microstructure and hardness of the weld. Results show that the crack propagates along the interface of lap weld with lower joining strength and forms a shear fracture mode when the plunge depth is smaller than the thickness of upper plate, the hook defect is flat and thicknesses of bonding ligament in the weld are almost the same, and the crack is more easily to propagate along the withdrawing path with shorter atom diffusion time and results in the shear-plug fracture. When the sleeve penetrates into the lower plate thickness of 15%, the hook defect bends upwards and the crack defect appears at the sleeve withdrawing path. When the

收稿日期: 2015-02-06。 作者简介: 岳玉梅(1971—),女,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51204111); 辽宁省自然科学基金资助项目(2013024004)。

网络出版时间: 2015-07-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150722.1638.002.html>

sleeve further plunges into the lower plate thickness of 35% and the hook defects present along a downward bending direction, the crack grows downwards along the withdrawing path of sleeve. When the crack reaches the bottom of lower plate, the plug fracture of RFSSW weld completed. These results show that the fracture morphologies are in agreement with analytical results of the fracture features.

Keywords: refill friction stir spot welding; fracture behavior; aluminum alloy; plunge depth

作为焊接领域的一个重要分支,点焊技术因具有经济效益好、工作效率高等优点而被广泛应用于汽车、铁路和船舶等领域中^[1]。在实际应用中,点焊件当承受过大载荷时会发生断裂失效,造成经济损失,更有甚者会造成严重的事故。因此,研究点焊接头的断裂行为、掌握其断裂机理对于深入了解焊接原理,进而提高接头抗拉剪载荷等的能力具有重要的意义^[2]。

回填式搅拌摩擦点焊(refill friction stir spot welding, RFSSW)是由搅拌摩擦焊发展而来的一种新型固相连接技术^[3]。RFSSW 可避免由常规搅拌摩擦点焊(FSSW)造成的匙孔缺陷,具有广阔的应用前景^[4-5]。自 RFSSW 发明至今,国内外学者在温度、流场、显微组织与力学性能等方面进行了大量研究^[6-7]。Suhuddin 等人对 AA5754 和 AZ31 铝镁合金的 RFSSW 过程进行了热电偶测温试验,指出焊核区温度峰值超过 450 °C^[5]。乔汝旺等人的研究表明,AZ31 镁合金与 5A06 铝合金搭接接头的界面附近出现了金属间化合物^[6]。Zhao 等人进行了 7B04-T74 铝合金的 RFSSW 试验,指出 hook 缺陷、包铝层的位置与硬度是影响接头性能的关键因素^[7]。

RFSSW 拉剪接头的断裂模式主要包括剪切断裂、剪切-塞型断裂与塞型断裂 3 种类型。Tier 等人 with Shen 等人除介绍 RFSSW 接头的断裂模式外,还对其断裂形貌进行了详细研究^[8-9]。然而,到目前为止,焊接工艺参数对 RFSSW 接头断裂机理的报导极少。因此,本文以 LY12 铝合金为例,对 RFSSW 接头进行了拉剪试验,并以下扎深度为焊接变量,重点分析不同下扎深度时 RFSSW 接头的断裂模式及机理。本文的研究对于深入了解 RFSSW 的焊接机理,提高焊接质量具有重要意义。

1 试验方法

铝合金由于具有强度高、塑性好、抗腐蚀性好等优点,因而在交通运输、航空航天等领域的众多结构件(如飞机蒙皮等)中得到广泛应用。LY12 铝合金属于硬铝合金,其拉伸强度可达到 475 MPa,是一种

在军用与民用领域均有着广泛应用的轻质合金。因此,本文所用试验材料为 LY12 铝合金。其中,上、下板尺寸分别为 140 mm×60 mm×1.5 mm 与 140 mm×60 mm×2 mm。焊接前将板材用砂纸打磨并用丙酮去除油污等杂质。焊接所用仪器型号为 RPS 100 SK10,搭接部分的尺寸为 50 mm×60 mm,焊点位于搭接区域的中心。搅拌头由压紧环、套筒与搅拌针组成,其中套筒内径与外径的尺寸分别为 5.2 mm 和 9 mm,压紧环的外径是 14.5 mm;搅拌针直径略小于套筒内径,其值为 5 mm。据相关文献可知^[8],RFSSW 过程中,决定其拉剪性能的最重要焊接参数是套筒下扎深度,因此本文的研究变量取为套筒的下扎深度。为了研究不同下扎深度对 RFSSW 拉剪接头断裂机理的影响,本文在焊接过程中,套筒下扎深度分别取 1.4 mm、1.8 mm 与 2.2 mm,其他参数如回填时间及搅拌头的旋转速度分别为 2.5 s 和 1 800 r/min。

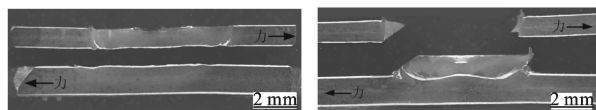
采焊后的金相试样用线切割沿焊点中心切割;而后经过砂纸打磨、抛光等步骤,利用凯勒试剂进行金相腐蚀;用型号为 Olympus-GX71 的光学显微镜对焊点的横截面形貌及显微组织进行分析。室温条件下在型号为 RG4300 的电子万能试验机上进行剪切拉伸试验,拉伸速度为 5 mm/min。拉伸试验结束后,在型号为 ZSA403 的体视显微镜下观察接头的断裂位置;并用扫描电子显微镜(KYKY-2800B)观察其断口形貌。

2 试验结果与讨论

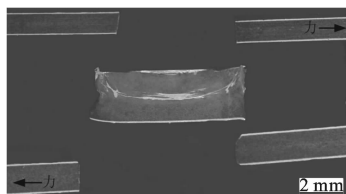
在 RFSSW 过程的下扎阶段,套筒下扎到试板中,高速旋转的套筒与上板或下板的材料摩擦,产生的热量使搅拌头周围的材料处于非熔化的高温低流动应力状态;随着套筒的下扎和搅拌针的回抽,热塑性材料由于受到挤压作用而流进二者相对运动所形成的空腔中。在回填阶段,套筒及搅拌针改变原来的运动方向转而向试板表面运动,高温材料又随二者的运动被回填到试板内部。LY12 是航空、汽车等领域常用的铝合金,板材表面有一层包铝层(纯

Al)以实现对接板内部合金成分的保护。在下扎和回填阶段,包铝层会随着搅拌头的旋转和直线运动而与板材内部的材料混合,且不同区域的混合程度不同。由于纯 Al 的强度和伸长率与 LY12 相差较大,因此包铝层在不同区域的分布对于 RFSSW 接头的断裂机制有着重要影响。同时,对于沉淀强化的 LY12 铝合金来说,材料经历高温过程会发生不同程度的软化。综上,考虑固相焊的本质,本文主要对材料流动、原子扩散与材料软化现象等方面对材料显微组织或缺陷的影响进行分析,进而阐述不同断裂模式下的断裂机理。

图 1 所示为不同下扎深度时 RFSSW 接头断裂后的整体形貌。通过分析可知:剪切断裂模式下的裂纹沿着未被打碎的搭接界面的包铝层扩展;剪切-塞型断裂下的裂纹基本上沿着套筒回抽路径扩展;塞型断裂模式下,整个焊点脱落,裂纹沿着套筒的下扎和回抽路径分别延伸到焊点的上、下表面。



(a) 剪切断裂(1.4 mm) (b) 剪切塞型断裂(1.8 mm)



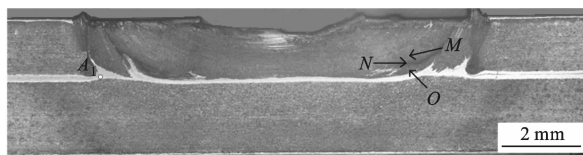
(c) 塞型断裂(2.2 mm)

图 1 3 种下扎深度下 RFSSW 接头的断裂形貌

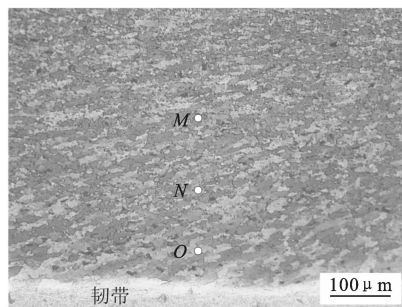
2.1 剪切断裂模式机理分析

图 2 是下扎深度为 1.4 mm 时焊点的横截面形貌及典型区域的显微组织;图 3 是图 1a 所示的焊点剪切断裂模式的示意图。图 2 中点 M、N 与 O 到搭接界面的距离分别是 0.3 mm、0.2 mm 与 0.15 mm (考虑包铝层的厚度)。

在 RFSSW 过程中,搅拌区内未熔化的材料温度应大于再结晶温度,且材料在套筒与搅拌针的作用下产生剧烈的流动,因此动态再结晶现象必然发生^[7]。搅拌区的材料受搅拌头的作用高速流动,进而带动周围的材料流动,且流动速度随到搅拌头距离的增加而减小。当搅拌头的下扎深度小于上板厚度时,搭接界面附近的流动速度极小甚至接近于 0。一般来说,材料的流动越剧烈,受到的应变与应变速率越大,利于增加焊接过程的形核率并获得细小的



(a) 焊点横截面



(b) 显微组织

图 2 下扎深度为 1.4 mm 时焊点的横截面与显微组织

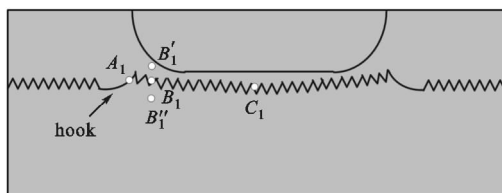


图 3 焊点剪切断裂示意图

晶粒^[10]。通过分析图 2b 可知,晶粒尺寸随着到搭接界面距离的增加而逐渐减小,证明了上述有关流动速度的分析。

综上,剪切断裂模式下,搭接界面两侧的包铝层主要发生原子扩散,在高温及高压的作用下形成焊接接头;材料受到的压力随着到焊点距离的增加而逐渐变小且迅速降为 0,因此近焊点的热机影响区无明显的间隙,而在远焊点处的间隙明显,这也是 hook 缺陷产生的原因之一,如图 2a 所示。由于搭接界面基本上未发生材料流动现象,因此,hook 缺陷的弯曲程度与距离较小,且韧带在焊点内不同区域的厚度基本相同。

当试样受剪切拉伸载荷时,开裂位置首先是 hook 缺陷的尖端(图 3 中点 A_1)。搭接界面两侧的材料只发生了原子扩散,由于扩散时间短,连接界面上的连接强度(点 B_1)远低于母材区域(点 B_1' 或 B_1''),因此,裂纹将沿着连接界面到点 B_1 扩展。裂纹进一步扩展到点 C_1 附近时则完成整个剪切断裂。

2.2 剪切-塞型断裂模式机理分析

当套筒的下扎深度为 1.8 mm 时,hook 缺陷向上弯曲,即尖端(点 A_2)位于上板,如图 4 所示。图 5 给出了剪切-塞型断裂的示意图。当接头承受剪切

拉伸载荷时,开裂位置首先应该出现在点 A_2 处。在剪切-塞型断裂过程中,焊点两侧的断裂路径存在差异,一侧沿套筒回抽路径扩展,另一侧沿较易理解的 45°C 方向扩展(见图 1b)。这主要与 hook 缺陷尖端点 A_2 邻近区域典型位置(点 A_2 正上方与焊点内部)的承载能力与受力情况有关。下面仅对沿套筒回抽路径的断裂机制进行分析。

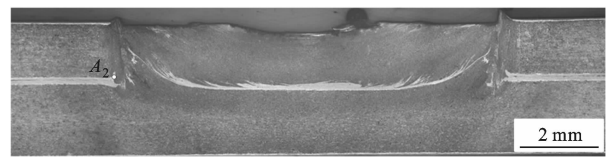


图 4 下扎深度为 1.8 mm 时焊点的横截面

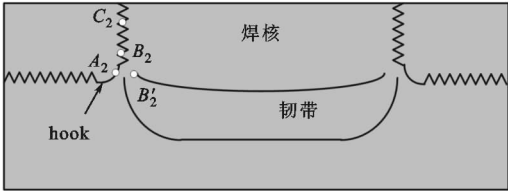


图 5 焊点剪切-塞型断裂示意图

对于 RFSSW 来说,根据位置的不同,搅拌区可分为套筒作用区(sleeve affected zone, SAZ)与搅拌针作用区(pin affected zone, PAZ)。在焊接过程中,由于下扎深度大于上板厚度,因此,SAZ 区的搭接界面两侧的包铝层会在下扎与回填阶段受到套筒的强烈搅拌作用,被打碎的包铝层发生流动并与 LY12 合金混合,充分混合的纯 Al 与 LY12 合金发生原子扩散。焊点中心附近的韧带只能受到搅拌头的间接作用,流动速度较小,与 LY12 合金的混合作用不足,因此焊点中间部分的韧带厚度较大;而套筒作用区的韧带厚度较小,甚至出现不连续的情况(见图 4),此处被打碎的纯 Al 与 LY12 合金之间发生原子扩散。在回填阶段,套筒内的材料受搅拌针的挤压逐渐由下而上的填充到 SAZ 区,因此在 SAZ 区与热机影响区(thermo-mechanically affected zone, TMAZ)间的界面处发生类似于固相扩散焊的过程。在 SAZ 区不同区域发生的原子扩散效果将直接影响连接强度,进而影响裂纹的扩展方向。对于原子扩散来说,压力、时间与温度是 3 个重要的因素。由于铝合金的热传导系数较大,可认为 SAZ 区的温度是相同的。图 5 中点 B'_2 位置附近的材料可受到搅拌头垂向压力的直接作用,而点 B_2 位于 SAZ 与 TMAZ 区的界面,与扩散相关的压力只能来自周围材料的挤压。因此,点 B'_2 位置附近的材料受到的压力较大。与点 B_2 相比,点 B'_2 无论是在

下扎阶段还是回填阶段均可发生原子扩散,因此扩散时间长。上述导致点 B'_2 尽管会出现原子扩散,但由于扩散效果好,裂纹只能沿点 B_2 扩展。

由于点 B_2 与 C_2 均位于 SAZ 与 TMAZ 区的界面,且两处影响原子扩散的压力也基本相同,而点 B_2 位于点 C_2 的下方, C_2 处的原子扩散时间短,因此具有较低的连接强度。由于 SAZ 区是焊接过程的高温区,在焊后的冷却过程中将产生拉应力,因此连接的薄弱区域将容易产生裂纹缺陷。本文试验中,在 SAZ 与 TMAZ 区的界面且靠近上板表面的区域(点 C_2 附近)发生了裂纹缺陷,如图 6 所示。综上,裂纹经点 A_2 向点 B_2 扩展,当裂纹进一步扩展到 C_2 时,试件的剪切塞型断裂过程结束。

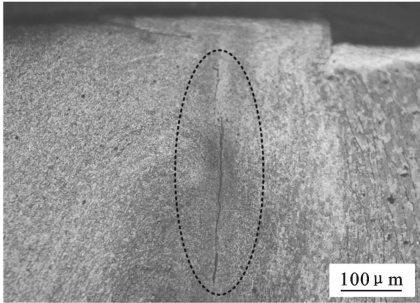


图 6 沿垂直连接界面方向分布的裂纹缺陷

2.3 塞型断裂模式机理分析

图 7 是下扎深度为 2.2 mm 时的焊点的横截面形貌及典型区域的显微组织,图 8 是如图 1c 所示的焊点塞型断裂模式的示意图。图 9 是典型位置的显微硬度曲线,其中测量点到连接界面的距离为 0.9 mm,即到最大下扎深度位置的距离为 0.2 mm。

由图 7 可知,当搅拌头的下扎深度较大(2.2 mm)时,hook 缺陷向下弯曲,即尖端位于下板,与图 2 与图 4 所示的向上弯曲明显不同。hook 缺陷的弯曲方向与尖端位置(点 A_3)说明裂纹更容易向下扩展。同时,由于拉剪力作用于上板,因此上板中套筒回抽路径区域亦是薄弱区域,呈现开裂的情况(如图 1c),原因与剪切-塞型断裂相同。下面对裂纹沿点 A_3 向下扩展的原因进行介绍。

点 B_3 位于下板中的 SAZ 与 TMAZ 间的界面区域,此区域在回填过程中亦发生原子扩散进而产生一定的连接强度,但其强度应小于点 B_3 两侧的 TMAZ 或 SAZ。点 C_3 、 C'_3 与 C''_3 位于套筒回抽区域的下方,且点 C_3 位于点 B_3 的正下方。在 RFSSW 的下扎阶段,当套筒下扎到最大深度时,其端面下方及周围区域的材料亦会产生不同程度的流动。图 8 所示的 C'_3 位于套筒端面中间的位置,其

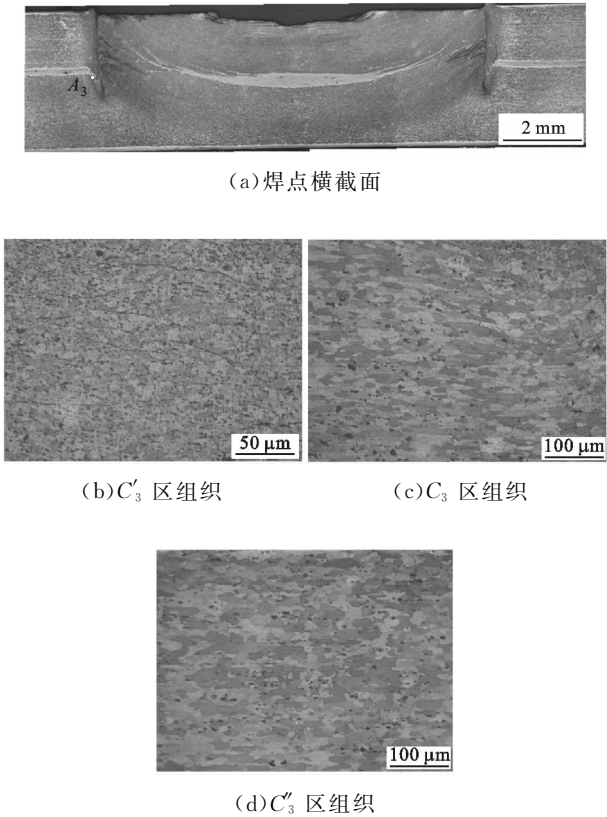


图 7 下扎深度为 2.2 mm 时焊点的横截面与显微组织

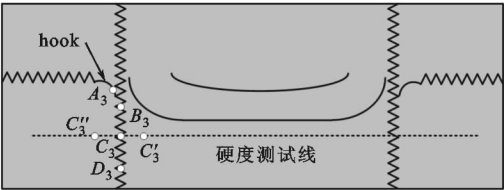


图 8 焊点塞型断裂示意图

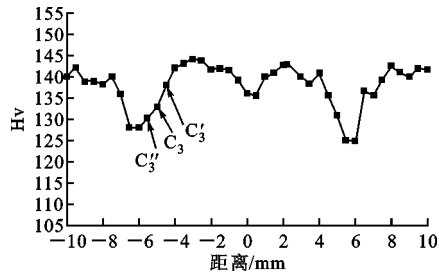


图 9 典型位置的硬度分布规律

材料流动速度较大,易发生动态再结晶,产生较小的晶粒(图 7b);点 C_3 处则受套筒的下压力作用而发生变形,因此,此区域相当于 TMAZ 区(见图 7c); C_3' 处的材料只受到材料的热作用而发生长大,相当于热影响区(图 7d)。因此, C_3' 硬度大于点 C_3 或 C_3'' 处,而最小硬度值出现在点 C_3 或 C_3'' 附近(见图 9)。当裂纹扩展到点 B_3 时,裂纹进一步的扩展区域位于套筒回抽路径边缘正下方(点 C_3)附近。综

上,当裂纹由点 A_3 向下扩展到连接强度较低的点 B_3 处后,将进一步向硬度较低的点 C_3 附近扩展。以此类推,当裂纹扩展到下板的下表面时,完成塞型断裂。

3 断口形貌分析

图 10 是剪切断裂模式下板 C_1 处的断口形貌。通过分析看出,该区域韧窝的数量较小、深度较浅且具有一定的方向性。由于较小的下扎深度和不充分的原子扩散作用,剪切断裂模式下搭接面处的连接强度较弱,从而形成图 10 所示韧窝形貌。韧窝的方向性是在剪切拉伸的过程中上下板之间的相对运动所致。

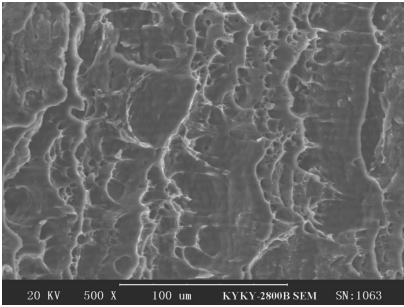
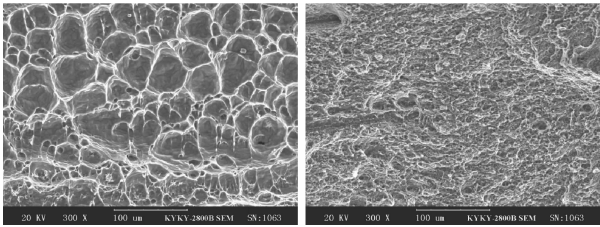
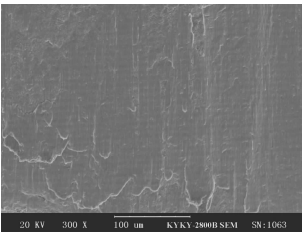


图 10 剪切断裂模式下的断口形貌

剪切-塞型断裂模式下典型位置的断口形貌如图 11 所示。从图中可以看出,沿着裂纹的扩展路径,韧窝的数量和深度逐渐减小,这与逐渐减弱的原子扩散作用有关。 A_2 与 B_2 间的区域由于较为充分的原子扩散作用而形成较强的连接,因此呈现数量较多且深度较大的韧窝;相对于 A_2 处, B_2 处的韧窝



(a) A_2 与 B_2 间的断口形貌 (b) B_2 处断口形貌

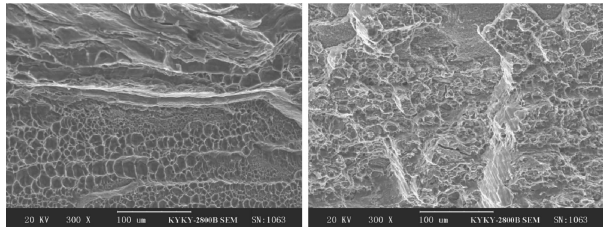


(c) C_2 处断口形貌

图 11 剪切-塞型断裂模式下的断口形貌

很小且深度很浅; C_2 处由于原子扩散的时间较短,是裂纹缺陷极易出现的位置,因此无韧窝存在。

图12是塞型断裂模式下 B_3 点处附近的断口形貌图。由图12可见: B_3 点的上部分接近 A_3 点,即hook缺陷的尖端,因此呈现形状不规则的层状结构,无韧窝存在;随着到搭接面距离的增加,韧窝出现,且数量逐渐变多、深度逐渐加大。由图7c可以看出,位于TMAZ的点 C_3 处由于套筒下端面的间接机械搅拌作用而形成大小不均匀的晶粒。除此之外,在焊接过程中点 C_3 处还受到摩擦热循环而发生软化,因此 C_3 处韧窝数量少且深度较浅。



(a) B_3 处断口形貌

(b) C_3 处断口形貌

图12 塞型断裂模式下的断口形貌

4 结 论

本文阐述了RFSSW接头的断裂机制,利用显微组织、显微硬度与断口形貌等的试验结果进行了说明与验证;并以下扎深度为焊接变量,研究了不同下扎深度对RFSSW接头断裂模式及机理的影响,得到以下结论。

(1)当套筒下扎深度小于上板厚度时,RFSSW接头的断裂模式为剪切断裂;上下板搭接界面由于较弱的原子扩散作用而未形成较强的连接,因此裂纹主要沿着搭接界面扩展。

(2)当套筒扎入下板且hook缺陷的尖端位于上板时,裂纹更易沿着仅发生原子扩散的TMAZ与SAZ区间的界面向上板上表面扩展,形成剪切-塞型断裂;当hook缺陷尖端位于下板且SAZ区下方材料软化程度较大时,裂纹易沿着TMAZ与SAZ区间的界面向下板下表面扩展,形成塞型断裂。

参考文献:

[1] YUAN W, MISHRA R S, CARLSON B, et al. Material flow and microstructural evolution during friction stir spot welding of AZ31 magnesium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 543: 200-209.

[2] HAN B, HUANG Y X, LÜ S X, et al. AA7075 bit for repairing AA2219 keyhole by filling friction stir welding [J]. Materials and Design, 2013, 51: 25-33.

[3] ZHAO Y Q, LIU H J, LIN Z, et al. Microstructures and mechanical properties of friction spot welded Al-clad 7B04-T74 aluminum alloy [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(7): 617-622.

[4] 申志康, 杨新岐, 张照华, 等. 铝合金回填式搅拌摩擦点焊组织及力学性能分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(6): 73-76.

SHEN Zhikang, YANG Xingqi, ZHANG Zhaohua, et al. Analysis of microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(6): 73-76.

[5] SUHUDDIN U F H, FISCHER V, DOS SANTOS J F. The thermal cycle during the dissimilar friction spot welding of aluminum and magnesium alloy [J]. Scripta Materialia, 2013, 68(1): 87-90.

[6] 乔汝旺, 蒋舒斐, 苗玉刚, 等. AZ31 镁合金/5A06 铝合金填充式摩擦点焊工艺特性 [J]. 电焊机, 2014, 44(4): 14-17.

QIAO Ruwang, JIANG Shufei, MIAO Yugang, et al. Processing property of magnesium/aluminum dissimilar metals for refill friction spot welding [J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(4): 14-17.

[7] ZHAO Y Q, LIU H J, CHEN S X, et al. Effects of sleeve plunge depth on microstructures and mechanical properties of friction spot welded alclad 7B04-T74 aluminum alloy [J]. Materials and Design, 2014, 62: 40-46.

[8] TIER M D, ROSENDO T S, DOS SANTOS J F, et al. The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminum welds [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(6): 995-1005.

[9] SHEN Z K, YANG X Q, ZHANG Z H, et al. Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints [J]. Materials and Design, 2013, 44: 476-486.

[10] JI S D, MENG X C, LIU J G, et al. Formation and mechanical properties of stationary shoulder friction stir welded 6005A-T6 aluminum alloy [J]. Materials and Design, 2014, 62: 113-117.

(编辑 刘杨)